

Spineffekte beim Tunneln durch Halbleiterquantenpunkte

Haug, Rolf J.

Veröffentlicht in:
Jahrbuch 2005 der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.151-154



J. Cramer Verlag, Braunschweig

Spineffekte beim Tunneln durch Halbleiterquantenpunkte*

ROLF J. HAUG

Abteilung Nanostrukturen, Institut für Festkörperphysik, Universität Hannover
Appelstraße 2, D-30167 Hannover

In den zwanziger Jahren des vorigen Jahrhunderts wurde bei Experimenten der Atomphysik eine zusätzliche Eigenschaft des Elektrons, der sogenannte Spin, der einen Eigendrehimpuls darstellt, gefunden [1]. Dieser Elektronenspin konnte erst später in der relativistischen Formulierung der Quantenmechanik durch Dirac theoretisch richtig beschrieben werden.

Spineffekte werden zur Zeit verstärkt untersucht, da sie im Zusammenhang mit der Quanteninformationsverarbeitung, also der Verarbeitung von Information nach quantenmechanischen Regeln, als ideales quantenmechanisches System diskutiert werden. Dabei wäre es wünschenswert, Spineffekte auch in Halbleitersystemen ausnutzen zu können, da dann auf die bewährten und technologisch ausgereiften Verfahren zur Massenherstellung von Bauelementen der Mikroelektronik zurückgegriffen werden könnte. Die kleinsten Systeme in Halbleiterstrukturen stellen Quantenpunkte dar. Diese winzigen Strukturen besitzen Abmessungen von wenigen Nanometern und wurden um 1990 erstmals erwähnt [2]. Die elektronischen Zustände in diesen Quantenpunkten können nur quantenmechanisch berechnet werden und man erhält diskrete, gebundene Zustände, ähnlich wie für elektronische Zustände natürlicher Atome. Deshalb werden derartige Halbleiterquantenpunkte auch häufig als „künstliche Atome“ bezeichnet. Im Gegensatz zu natürlichen Atomen können die Eigenschaften von Halbleiterquantenpunkten fast beliebig, jedoch definiert verändert werden [3].

Zur Herstellung von Halbleiterquantenpunkten ist der Einsatz der modernsten Verfahren der Mikroelektronik und sogar darüber hinausgehender, innovativer Technologien notwendig. Häufig geht man von mittels Molekularstrahlepitaxie hergestellten Schichtstrukturen aus, die ein zweidimensionales Elektronengas enthalten. An solchen Systemen können quantenmechanische Effekte, wie der 1980 gefundene Quanten-Halleffekt und eine ganze Anzahl verschiedener Wechselwirkungs- und Spineffekte beobachtet werden (jüngste Arbeiten siehe

* Vortrag gehalten beim Kolloquium anlässlich der Jahresversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft am 27. Mai 2005.

[4,5,6,7]) . Um Quantenpunkte zu erhalten, müssen diese Schichtsysteme noch mittels Lithographietechniken strukturiert werden. Hierzu müssen entweder Elektronenstrahlolithographietechniken [8] oder innovativere Verfahren wie das Direktschreiben mit dem Rasterkraftmikroskop [9] eingesetzt werden. Jedoch kann auch die Natur zu Hilfe genommen werden, um Halbleiterquantenpunkte ganz ohne aufwändige Technologie herzustellen. Beim Wachstum von gitterfehlangepassten Schichten auf einem Substrat können aufgrund des Stranski-Krastanov-Wachstums anstatt ebener Schichten kleine Materialinseln, selbstorganisierte Quantenpunkte, entstehen [10].

Bevor man über die quantenmechanische Beschreibung von Quantenpunkten beim Tunneln nachdenkt, ist es zuerst interessant, die Elektrostatik dieser winzigen Quantenpunkte zu betrachten. Aufgrund ihrer geringen Abmessungen ist ihre elektrische Kapazität zur Umgebung ebenfalls sehr klein. Damit kann jedoch die Lade-Energie, die aufgewendet werden muss, um ein zusätzliches Elektron auf den Quantenpunkt zu bringen, und die umgekehrt proportional zur Kapazität ist, sehr groß werden. Ist die Lade-Energie deutlich größer als thermische Fluktuationen, kann an solchen Quantenpunkten das Laden mit einzelnen Elektronen beobachtet werden, ja es ist sogar möglich, Quantenpunkte, die nur ein zusätzliches Elektron enthalten, zu untersuchen. Die Energiezustände, auf die Elektronen tunneln können, werden ja, wie oben erwähnt, durch die Quantenmechanik beschrieben. In unserem Zusammenhang ist der Eigendrehimpuls, der Spin des Elektrons, der quantenmechanisch zwei Einstellmöglichkeiten aufweist und deshalb für die Quanteninformationsverarbeitung von besonderem Interesse ist, wichtig. Im Magnetfeld können für diese zwei Einstellmöglichkeiten eines Elektronenspins – parallel oder antiparallel zur Magnetfeldrichtung – Energieunterschiede beobachtet werden. Kürzlich gelang es für ein einzelnes Elektron in einem Quantenpunkt diesen Energieunterschied genau zu vermessen [11]. Dabei stellte es sich heraus, dass dieser Energieunterschied von der Magnetfeldrichtung in Bezug auf die scheibenförmige Geometrie des Quantenpunktes abhängt. Dies konnte auf den Einfluss der Spin-Bahn-Wechselwirkung zurückgeführt werden. Damit gelang es erstmals die maßgeblichen Parameter der Spin-Bahn-Wechselwirkung an einem Halbleitersystem quantitativ zu bestimmen. Dies eröffnet die Möglichkeit über Wahl der Richtung und der Stärke des Magnetfeldes gezielt die elektronischen Zustände der einzelnen Elektronen zu beeinflussen. In hohen Magnetfeldern führen nicht nur Spineffekte in den Quantenpunkten, sondern auch in den Zuleitungen, aus denen die Elektronen in die Quantenpunkte tunneln, bzw. in die sie tunneln, zu messbaren Effekten, da der Energieunterschied für die beiden Spinrichtungen so groß wird, dass die Zuleitungen effektiv spinpolarisiert werden. Damit kann nur noch aus Zuständen einer Spinrichtung getunnelt werden. Dies ermöglicht die Untersuchung von Spinstrukturen für Systeme von in großen Bereichen variierenden Elektronenzahlen, ausgehend von den schon erwähnten Quanten-

punkten mit einzelnen Elektronen bis hin zu Quantenpunkten mit mehreren hundert Elektronen, gekoppelten Quantenpunktsystemen [12] und Quantenringen [13]

Für die Quanteninformationsverarbeitung ist es, über das Verständnis der Spineffekte in Quantenpunkten hinaus, auch notwendig, Informationen über die Spinstrukturen eines Quantenpunktes ohne direkte Beeinflussung desselben, d.h. ohne das Tunneln eines zusätzlichen Elektrons in den Quantenpunkt, zu erhalten. Hierzu können elektrostatisch ankoppelnde Quantenpunktkontakte eingesetzt werden. Auf diese Weise ist es schon gelungen, Informationen über Spinstrukturen und Umladungsvorgänge [14] und damit über quantenmechanische Zustände in Quantenpunkten zu erhalten. Damit sind erste Schritte im Hinblick auf den Einsatz von Quantenpunkten als Bausteine der Quanteninformationsverarbeitung, bei der nach quantenmechanischen Regeln gerechnet wird und bei der quantenmechanische Zustände ausgelesen werden, getan.

Literatur

- [1] O. STERN & W. GERLACH: Zeitschrift für Physik 8, 100 (1921) und 9, 349 (1922).
- [2] R.J. HAUG, K.Y. LEE & J.M. HONG: Mat. Res. Soc. EA-26, 29 (1990).
- [3] R.J. HAUG: Advances in Solid State Physics 34, 219 (1994).
- [4] F. HOHLS, U. ZEITLER & R.J. HAUG: Phys. Rev. Lett. 88, 036802 (2002).
- [5] F. SCHULZE-WISCHELER, E. MARIANI, F. HOHLS & R.J. HAUG, Phys. Rev. Lett. 92, 156401 (2004).
- [6] F. SCHULZE-WISCHELER, F. HOHLS, U. ZEITLER, D. REUTER, A.D. WIECK & R.J. HAUG: Phys. Rev. Lett. 93, 026801 (2004).
- [7] G. SUKHODUB, F. HOHLS & R.J. HAUG: Phys. Rev. Lett. 93, 196861 (2004).
- [8] K.Y. LEE, D.P. KERN, K. ISMAIL, R.J. HAUG, T.P. SMITH, W.I. MASSELINK & J.M. HONG: J. Vac. Sci. Technology B8, 1366 (1990).
- [9] H.W. SCHUMACHER, U.F. KEYSER, U. ZEITLER, R.J. HAUG & K. EBERL: Appl. Phys. Lett. 75, 457 (2000), U.F. Keyser, H.W. Schumacher, U. Zeitler, R.J. Haug, K. Eberl, Appl. Phys. Lett. 76, 457 (2000)
- [10] I. HAPKE-WURST, U. ZEITLER, U.F. KEYSER, R.J. HAUG, K. PIERZ & Z. MA: Appl. Phys. Lett. 82, 1209 (2003).
- [11] J. KÖNEMANN, R.J. HAUG, D.K. MAUDE, V.I. FALKO & B.L. ALTSHULER: Phys. Rev. Lett. 94, 226404 (2005).

- [12] M.C. ROGGE, C. FÜHNER, U.F. KEYSER & R.J. HAUG: Appl. Phys. Lett. 85, 606 (2004).
- [13] U. F. KEYSER, C. FÜHNER, S. BORCK, R.J. HAUG, M. BICHLER, G. ABSTREITER & W. WEGSCHEIDER: Phys. Rev. Lett. 90, 196601 (2003)
- [14] C. FRICKE, M.C. ROGGE, B. HARKE, M. REINWALD, W. WEGSCHEIDER, F. HOHLS & R.J. HAUG: Phys. Rev. B 72, 193302 (2005)